Jb. nass. Ver. Naturkde. **137** S. 63-84 7 Abb. 5 Tab. Wiesbaden 2016

Klimaänderungen in Frankfurt/Main seit 1758

Andreas Hoy

Wetter, Witterung, Klima, Klimawandel, Zeitreihen, Temperatur, Niederschlag

Zusammenfassung: Die langjährigen Klimabeobachtungen für Frankfurt/Main stellen nicht nur regional im nassauischen, sondern auch großräumig im deutsch-europäischen Kontext ein sehr wertvolles Datenmaterial zur Bewertung klimatischer Veränderungen dar. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit Veränderungen von Temperatur und Niederschlag seit 1870, für die Temperatur z. T. sogar seit 1758. Er beinhaltet eine ausführliche Diskussion des Datenmaterials und seiner Verwendbarkeit. Aus den anschließenden klimatologischen Auswertungen erschließt sich eine – im Kontext der vergangenen rund 260 Jahre – beispiellose Erwärmung in den vergangenen 30 Jahren (1986–2015). Niederschlagsvariationen sind zeitlich und räumlich weniger stabil. Sie werden daher für ein Kollektiv von elf Stationen in und um Frankfurt diskutiert.

Long-term climatic changes in Frankfurt/Main

ANDREAS HOY

Weather, climate, climate change, time series, temperature, precipitation

Abstract: Long-term climate observations are available for Frankfurt/Main. They represent a scientifically highly valuable source for evaluating climatic changes in central Germany and beyond. This contribution investigates alterations of temperature and precipitation since 1870, for temperature in some cases since 1758. It includes a thorough discussion of the used data material and its applicability to climatology. A strong, unprecedented warming – compared to the past ~260 years – appeared within the recent 30 years (1986–2015). Since precipitation shows a high spatiotemporal variability, a set of eleven stations in and around Frankfurt is used to discuss its long-term variations.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Der Ballungsraum Frankfurt/Rhein-Main ist das Zuhause für ca. 2,2 Millionen Menschen, in Frankfurt/Main selbst leben über 700.000 Einwohner. Frankfurt und sein Umland beherbergen somit mehr als 1/3 der Bevölkerung des Bundeslandes Hessen, umfassen aber nur 10 % der hessischen Fläche. Geografisch gesehen befindet sich die Region im westlichen Teil Mitteleuropas und ist im Verhältnis zu anderen, auf gleichen Breitengraden gelegenen Orten, durch vergleichsweise mildes, von atlantischen Tiefdrucksystemen beeinflusstes Klima geprägt. Allerdings grenzen die Höhenlagen des Taunus die Stadt und den Ballungsraum nach Westen hin ab und schwächen – zusammen mit weiteren vorgelagerten Mittelgebirgen – die vom Atlantik kommenden Niederschlagsgebiete soweit ab, dass die Region vergleichsweise trocken ist. Durch die schon etwas weiter vom Meer entfernte Lage von Frankfurt/Main wechseln sich maritim und kontinental beeinflusste Luftmassen recht häufig ab und bilden charakteristische, in jedem Jahr unterschiedlich ausgeprägte Witterungsabschnitte.

Die Frankfurter Wetterbeobachtungen rechtfertigen aus vielfältigen Gründen eine nähere Betrachtung, nicht nur im „Nassauischen Kontext“, sondern auch bezogen auf Deutschland und Europa. Zum einen ergibt sich ein überdurchschnittliches Interesse an regionalklimatologischen Fragestellungen aufgrund der hohen Bevölkerungszahl der Region, zum anderen rechtfertigt die lange Historie der Frankfurter Wetteraufzeichnungen diese Auswertungen. Die längste Zeitreihe – die Rekonstruktion jährlicher Mittelwerte der Lufttemperatur – beginnt bereits im Jahre 1758 und umfasst damit inzwischen mehr als 250 Jahre. Diese Beobachtungsreihe wurde auf den heutigen Standort am Frankfurter Flughafen homogenisiert und kann daher (unter Beachtung von Unsicherheiten) zur Bewertung langzeitlicher Klimaänderungen verwendet werden. Seit 1870 liegen für Frankfurt Daten vieler Klimaelemente digital in täglicher Auflösung vor, die durch den Deutschen Wetterdienst bereitgestellt werden. In diesem Beitrag werden ausgewählte Aspekte dieser Datenreihen betrachtet, basierend auf den zwei wichtigsten Klimaparametern – Temperatur und Niederschlag.

2 Datengrundlage und -qualität

2.1 Anforderungen an Klimabeobachtungen

Meteorologische Daten sollen für ein größeres Gebiet repräsentativ sein und nicht lokale, standortspezifische Charakteristika widerspiegeln. Die Zeitreihen sollen die natürlichen Variationen von Wetter und Klima ausdrücken, möglichst ohne durch nicht-klimatologische Faktoren beeinflusst zu sein. Leider wird diese zentrale Anforderung nur in ganz wenigen Fällen vollständig erfüllt. Ein Beispiel, das diesem Ideal nahe kommt, ist die Säkularstation Potsdam-Telegrafenberg westlich von Berlin (https://www.pik-potsdam.de /services/infothek/telegraphenberg-d/suering-haus/sakularstation), wo seit 1893 mit den gleichen Messinstrumenten, an gleichem Standort und nach einheitlichen Bedingungen gemessen wird.

Die meisten langen Zeitreihen sind allerdings durch verschiedene nicht-klimatologische Effekte beeinflusst, beispielsweise die Veränderung (Austausch/Ver-

besserung/Alterung) und räumliche Verlegung von Messinstrumenten (incl. Veränderung der Messhöhen), Änderungen in den Beobachtungszeiten und -häufigkeiten, veränderte Beobachtungsregeln, Umstellung der Messeinheiten, Veränderungen im direkten Umfeld der Station (Pflanzen- und Baumwachstum) und weitere Faktoren (z. B. AUER et al. 2001; BRAZDIL et al. 2012). Der zunehmenden Urbanisierung, die zu einem künstlichen Temperaturanstieg insbesondere an innerstädtischen Standorten führt, wurde häufig durch eine Verlegung der Stationen an Stadtränder, ins Umland oder an die Flughäfen Rechnung getragen. Solche Verlagerungen beeinflussen die Zeitreihen allerdings mannigfaltig. Dies betrifft nicht nur die Mittelwerte, auch Extremwerte, die Standardabweichung oder der Jahresgang verändern sich dadurch. Die Zeitreihe der Stadt Frankfurt/Main ist durch viele der beschriebenen Effekte geprägt, die im Folgenden in knapper und nicht erschöpfender Form diskutiert werden sollen.

2.2 Zeitreihen der Lufttemperatur Frankfurt/Main

Die **jährliche Zeitreihe von 1758 bis 2015** wird zur Diskussion langzeitlicher Temperaturänderungen verwendet. Sie wurde von BRINCKMANN (2005) auf den gegenwärtigen Standort Frankfurt/Main-Flughafen angepasst (betrifft die Werte vor 1951; jährliche Reduktionszahl ca. 0,7 K). Anhand multipler Homogenitätstests stufen RAPP & SCHÖNWIESE (1996) die Frankfurter Reihe als „wahrscheinlich inhomogen" ein, allerdings fallen laut SCHÖNWIESE (2015) die Zeiten mit Standortwechseln nicht durch eklatante Temperatursprünge auf. Die Beobachtungen der Lufttemperatur sind jedoch bis in die 1850er-Jahre durch häufig wechselnde Instrumente und Aufstellungsorte gekennzeichnet (ZIEGLER & KÖNIG 1896; MOLLWO 1958). Durch messtechnische Schwächen (Glasalterung der Thermometer; WINKLER 2009) und mangelnde Abschirmung der Sonnenstrahlung (PARKER 1994; BÖHM et al. 2010) ist davon auszugehen, dass die in Kapitel 3 präsentierten Daten bis nach Mitte des 19. Jahrhunderts etwas zu hoch liegen (SCHÖNWIESE 2015).

Die ersten, sporadisch vorliegenden Temperaturangaben aus Frankfurt beziehen sich zumeist auf sehr kalte Wintertemperaturen, etwa der Jahre 1695, 1709 und 1740 (ZIEGLER & KÖNIG 1896). Regelmäßige Aufzeichnungen der Lufttemperatur liegen von 1758 bis 1786 durch Beobachtungen des Kaufmanns Peter Meermann – vermutlich vorgenommen im heutigen Stadtzentrum – vor. Das von ihm benutzte Thermometer, das nicht mehr erhalten ist, hing immer außerhalb eines Fensters in Richtung Norden in freier Luft – bis 1766 im ersten, dann im zweiten Stockwerk. Es wurde täglich eine Messung von Maximum (14 oder 15 Uhr) und Minimum (im Bereich Sonnenaufgang, je nach Monat unterschiedliche Zeiten) vorgenommen (ZIEGLER & KÖNIG 1896, 1901). Die Jahresmittel bis 1786 basieren auf diesen und ggf. noch weiteren vorliegenden Messungen.

Mehrere Jahrzehnte ohne (oder mit nur unvollständigen Messungen) folgen (ausführlichere Informationen in ZIEGLER & KÖNIG 1896). Erst ab 1826 gab es wieder umfangreichere meteorologische Aufzeichnungen (MOLLWO 1958). Die jährliche Zeitreihe der Frankfurter Lufttemperatur liegt dennoch durchgängig seit 1758 vor, da der fehlende Zeitraum 1786 bis 1825 durch lineare Regression anhand der Zeitreihe der Deutschland-Flächenmittelwerte (RAPP 2000) geschlossen werden konnte (SCHÖNWIESE 2015).

Seit 1870 sind für verschiedene Standorte in der Frankfurter Innenstadt (siehe Tab. 1) Temperaturaufzeichnungen in täglicher Auflösung für Temperaturmittel, -minimum und -maximum vorhanden, an die ab 1870 die jeweils gültigen Instrumentenkorrekturen angebracht wurden (ZIEGLER & KÖNIG 1896; MOLLWO 1958). Bis 1879 wurde noch die Teilung nach 1/5° Reaumur benutzt, dann durchgehend die Einheit °C. Bis 1887 wurden die Thermometer an der Nordseite eines Gebäudes aufgestellt und nur durch kleine Schirme gegen Niederschläge und direkte Strahlung geschützt. Dieses Konstrukt wurde Ende 1887 durch einen drehbaren, allerdings nicht völlig geschlossenen Schutzbehälter ersetzt. Ab 1897 kam die bekannte (weiße, lamellierte) Englische Wetterhütte zum Einsatz. Die Mittelung der Lufttemperatur erfolgte zunächst anhand der Terminwerte 6, 14 und 22 Uhr Mitteleuropäische Zeit (MEZ), ab 1893 für die Werte 7, 14 und 21 Uhr MEZ[1] (ZIEGLER & KÖNIG 1896; MOLLWO 1958). Der dritte Messtermin ging dabei mit doppelter Gewichtung in die Berechnung ein.

Die Zeitreihe von 1870 bis 1950 ist bis auf den Zeitraum von März bis Mai 1945 lückenlos. Diese dreimonatige Lücke wurde in diesem Beitrag über die Daten der Station Darmstadt, 25 km südlich von Frankfurt/Main und 60 m höher gelegen, gefüllt[2]. Die Darmstädter Werte liegen aufgrund des Höhenunterschiedes etwas unter denen von Frankfurt, die Unterschiede zwischen beiden Stationen sind, basierend auf einem Vergleich mit anderen Frühjahrsmonaten späterer Jahre, aber statistisch vertretbar und weniger problematisch als eine Lücke in der Zeitreihe.

Tabelle 1: Standorte der täglichen Temperaturmessungen Frankfurt/Main Stadt 1870 bis 1950, basierend auf MOLLWO (1958)

Table 1: Location of daily temperature measurements in Frankfurt/Main city 1870 until 1950, based on MOLLWO (1958)

Zeitraum (Höhenlage)	**Lagebeschreibung**
1870–1907 (102m NN)	östlich des Eschenheimer Turms; begrenzt durch Bleichstr., Brönnerstr., Stephanstr., Stiftstr.
1908–1925 (97/122m NN)	Robert-Mayer-Str.; Achtung: 1914-1925 auf 25m hoher Plattform über den Dächern!
Ab 1926 (103m NN)	Feldbergstraße
Alle Stadtbeobachtungen wurden bis 1961 im Gelände der Dr. Senckenbergischen Stiftung ausgeführt.	

1949 eröffnete die meteorologische Station am Frankfurter Flughafen, ca. 10 km südwestlich des Stadtzentrums gelegen, deren Werte (neben den Innenstadtwerten) in diesem Beitrag ab 1951 verwendet werden. Die Werte der Flughafenstation sind gegenüber der Innenstadtlage besonders wertvoll, da der Standort seit seiner Einrichtung weitgehend konstant geblieben ist, während die Stadtstation weiterhin verschiedenen Standortveränderungen unterworfen war

[1] Im Jahre 1987 wurden die Termine um eine halbe Stunden nach hinten verschoben (Änderung auf 7:30, 14:30, 21:30 Uhr MEZ)

[2] Die Station Darmstadt befand sich in diesem Zeitraum im Osten der Stadt auf einem flachen Hügel auf 180 m ü. NN. Die Umgebung bestand aus Park- bzw. Garten- und Obstgelände (EISENHARDT 1968).

(Tab. 2). So zog die Station zwischenzeitlich (12/1961 bis 8/1984) aus der nördlichen Innenstadt (Feldbergstraße[3]) in Richtung nördlicher Stadtrand (Wöhlerschule, Waldorfschule) um. Seit November 1985 befindet sie sich wieder in der Nähe ihres ursprünglichen Standortes. Die Zeitreihe am Flughafen ist außerdem lückenlos, während an der Stadtstation von September 1984 bis Oktober 1985 eine Lücke von 14 Monaten auftrat (für diese Lücke wurden hier die Flughafenwerte verwendet). Zusätzlich wurde mit der Verlagerung zum Flughafen der zunehmende Urbanisierungseffekt (künstlicher Temperaturanstieg) umgangen, wenngleich in der kombinierten Innenstadt-Flughafen-Reihe dadurch 1951 ein Bruch zu tieferen Temperaturen zu verzeichnen ist, der in den täglichen Daten aufgrund des immensen Aufwandes nicht zu homogenisieren ist.

Tabelle 2: Metadaten der meteorologischen Messungen in Frankfurt/Main Stadt ab 1951; basierend auf FRÜH et al. (2011), dem Klimadatenzentrum des Deutschen Wetterdienstes (ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/) und eigenen Recherchen

Table 2: Metadata of meteorological measurements in Frankfurt/Main city from 1951 onwards; based on FRÜH et al. (2011), the Climate data centre of the German Weather Service (ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/) and own investigations

Lage	Zeitraum	Höhe	Charakteristik
Feldbergstraße	1951–11/1961	109 m	sehr dichte Bebauung
Wöhlerschule	12/1961–3/1973	125 m	dichte Bebauung
Waldorfschule	4/1973–8/1984	125 m	lockere Bebauung, Grünflächenrand, kleine Senke
Palmengarten	11/1985–7/2008	107 m	Parkanlage mit Gewächshäusern, straßennah
Unicampus Westend	seit 8/2008	124 m	kleine Parkanlage, lockere Bebauung

Die **tägliche Zeitreihe von 1870 bis 2015** wird daher in zwei Ausprägungen verwendet: 1) bestehend nur aus den Werten der verschiedenen Standorte der Innenstadt bzw. 2) als Kombination von Innenstadt (bis 1950) und Flughafen (ab 1951). Die Reihen sind nicht homogenisiert. Falls Datenqualitätsaspekte die klimatische Interpretation beeinflussen, werden sie in Kapitel 3 diskutiert.

Der Einfluss der städtischen Wärmebelastung wurde durch FRÜH et al. (2011) am Beispiel Frankfurt/Main im Vergleich mit den Flughafenwerten ab 1950 untersucht. Sie zeigen eine deutliche Beeinflussung der jeweiligen Stadtstandorte durch Bebauungsdichte und Grünflächenanteil. Kaum eine Überwärmung trat dabei am Standort Waldorfschule auf – ein lokaler Effekt durch Grünfläche und leichte Senkenlage. Die stärkste Überwärmung wurde hingegen an der Feldbergstraße – inmitten sehr dichter Bebauung gelegen – beobachtet.

[3] Am Standort Feldbergstraße wurde (inoffiziell) durch das Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt bis 1994 weiterhin gemessen (GRIESEL 1988; SCHÖNWIESE, mündliche Mitteilung). Diese Werte liegen für diesen Beitrag allerdings nicht vor.

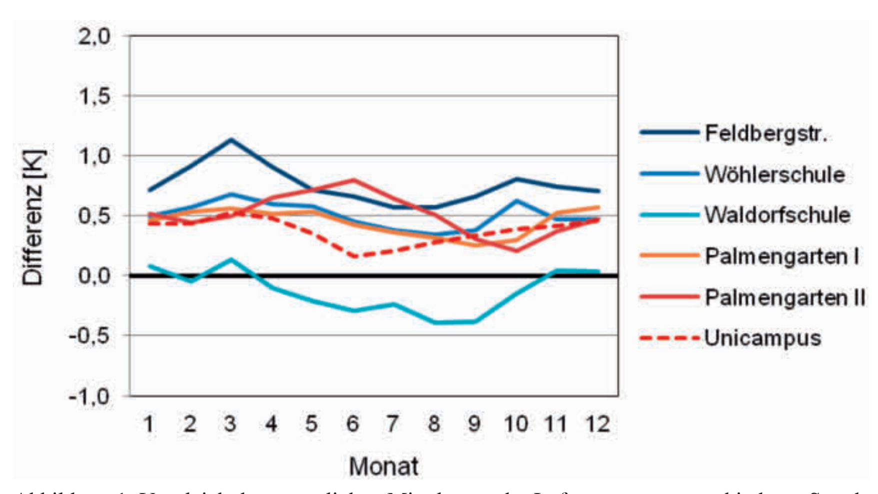


Abbildung 1: Vergleich der monatlichen Mittelwerte der Lufttemperatur verschiedener Standorte der Frankfurter Innenstadtstation mit den Werten der Station Frankfurt-Flughafen (siehe Tab. 2); Standort Palmengarten für Vergleichszwecke mit den anderen Stationen in zwei ähnlich lange Perioden getrennt: 11/1985 bis 1996 (I) und 1997 bis 7/2008 (II).

Figure 1: Comparison of monthly air temperature averages for different Frankfurt city locations with values of Frankfurt airport (see table 2); location "Palmengarten" split into two periods of similar lenght for comparison purposes: 11/1985 until 1996 (I) and 1997 until 7/2008 (II).

Da sich auch die früheren Standorte seit 1870 (siehe Tab. 1 und Lageplan in WACHTER 1939) im dicht bebauten Innenstadtbereich befanden, ist dort von einer ähnlich starken Überwärmung wie zu späteren Zeiten auszugehen. Das bedeutet, dass die Flughafenwerte in der Analyse der täglichen Temperaturen ab 1951 analog den in Abbildung 1 gezeigten Mittelwerten (zumeist) niedriger liegen. Gegenüber den seit 1870 gemessenen Werten ist also bei Verwendung der kombinierten Innenstadt-Flughafen-Reihe im Jahr 1951 zunächst ein künstlicher Rückgang der Mittelwerte um ca. 0,7 K anzunehmen. Die Abweichungen der Minima sind größer, die der Maxima kleiner. Die Abweichungen zwischen Flughafen und Stadt sind, vor allem bezogen auf das Temperaturminimum, im Winter und Frühling am größten und im Sommer am geringsten. In Strahlungsnächten und in auf sehr starke Strahlungstage folgenden Nächten sind dabei überdurchschnittlich große Unterschiede zwischen den Stationen zu erwarten. Dies zeigt sich an den systematisch höheren Temperaturminima an den Stadtstandorten: die im Stadtbereich (Straßen, Gebäude) tagsüber gespeicherte Wärme wird nachts abgestrahlt und reduziert damit die nächtliche Abkühlung. Dieser Effekt wird als „städtische Wärmeinsel“ bezeichnet.

Im Zuge der Automatisierung des Messnetzes des Deutschen Wetterdienstes fand in den letzten Jahrzehnten eine Umstellung der Messverfahren von konventionellen zu automatisierten Datenerfassungsmethoden statt. Im Zuge dieser Umstellung werden die täglichen Mittelwerte der Lufttemperatur seit 1. April 2001 auf stündlicher Basis (24 Werte/Tag ersetzen die bisherigen drei Terminwerte) berechnet (KASPAR & HANNAK 2016). An den Klimareferenzstationen des Deutschen Wetterdienstes wurde der Einfluss der veränderten Messverfah-

ren auf die Homogenität der Zeitreihen daraufhin umfangreich untersucht (AUGTER 2013). Dabei zeigten sich nur sehr geringe Effekte der a) Umstellung der Messtechnik (Differenz im Mittel -0,03 K) und b) der neuen Berechnungsmethodik der Tagesmittelwerte (Differenz im Mittel -0,08 K) auf das Tagesmittel der Lufttemperatur. Eine relevante künstliche Beeinflussung der Zeitreihen der mittleren Lufttemperatur durch die Automatisierung der Messungen kann also ausgeschlossen werden (KASPAR & HANNAK 2016). Bezogen auf maximale und minimale tägliche Temperaturen liefern die neuen Messverfahren bei hohen Maxima marginal größere, bei niedrigen Minima etwas geringere Werte als die konventionellen Messungen (mittlere Differenzen: 0,01 K für das Temperaturmaximum, 0,04 K für das Temperaturminimum; AUGTER 2013).

2.3 Zeitreihen des Niederschlags Frankfurt/Main

Die Niederschlagsverteilung ist durch eine weit größere räumliche Heterogenität als die der Temperatur gekennzeichnet. Während letztere, an einem repräsentativen Standort gemessen, für ein größeres Gebiet sowohl in ihren Mittel- als auch Extremwerten aussagekräftig ist, ist dies beim Niederschlag nur sehr eingeschränkt der Fall. Eine homogene Datenreihe vorausgesetzt, kann eine Zeitreihe des Niederschlags halbwegs aussagekräftige Mittelwerte für ein größeres, topographisch nicht allzu gegliedertes Gebiet abseits großer Wasserflächen bereitstellen. Eine Aussage zur zeitlichen Entwicklung von Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen ist anhand von Punktmessungen nur (und auch das nur eingeschränkt) über die Einbeziehung möglichst vieler Stationen möglich, da insbesondere Konvektivereignisse große Unterschiede in der Niederschlagsverteilung in kleinen Gebieten generieren. Da im Fall der langen Frankfurter Klimazeitreihe (tägliche Werte seit 1870) aufgrund der vielen Änderungen der Messbedingungen keine Homogenität der Zeitreihe gegeben ist, werden weitere, im Raum Frankfurt gelegene Niederschlagsstationen in die Auswertungen mit einbezogen.

Die Standorte der Niederschlagsmessungen ab 1870 entsprechen denen, die bereits in Kapitel 2.2 für die Temperatur diskutiert wurden. Analog beziehen sich die Daten bis 1950 auf den Standort Frankfurt-Stadt (Tab. 1), ab 1951 zumeist auf den neuen Standort am Flughafen. Aufgrund der häufigen Wechsel der Beobachtungsstandorte der Stadtstation nach 1951 (Tab. 2) wird für langzeitliche Betrachtungen ab 1870 nur die kombinierte Innenstadt-Flughafen-Zeitreihe verwendet.

Die weiteren in diesem Beitrag verwendeten Niederschlagsstationen sind in Tabelle 3 beschrieben. Die genaue räumliche Lage ergibt sich aus den in Kapitel 4 gezeigten Karten. Bei der Auswahl der in und um Frankfurt gelegenen Stationen wurden bewusst nur die unmittelbar im Ballungsraum gelegenen Tieflandgebiete (80 bis 130 m ü. NN) selektiert. Eine Einbeziehung der umliegenden Mittelgebirgs- und Hügelgebiete, insbesondere des Taunus, wäre aus wissenschaftlicher Sicht spannend, würde aber an dieser Stelle eine zu große Ausweitung des Themas bedeuten. Eine inzwischen etwas antiquierte Abhandlung zu starken Niederschlägen in der Region ist in ANIOL (1954) zu finden. Die Bachelor-Arbeit von HIEN (2012) beschäftigt sich mit dem Höhengradienten von Niederschlägen in der Taunusregion.

Tabelle 3: Metadaten der verwendeten Niederschlagsstationen (Höhe: in m ü. NN; 1951–2000: Datenabdeckung im in Kapitel 4 verwendeten Kernzeitraum)
Table 3: Metadata of the employed precipitation stations (elevation in m a. s. l.; 1951–2000: data coverage in the case study period used in chapter 4)

Standort	**Höhe**	**Zeitraum**	**Beobachtungslücken**	**1951-2000**
F-Flughafen	100 m	1949–2016	keine	100,0%
F-Stadt	124 m	1870–2016	3–5/1945; 9/1984–10/1985; 3–4/2000	97,3%
F-Praunheim	113 m	1931–2004	1945 & 1946	100,0%
F-Sindlingen	95 m	1951–10/1995		88,8%
Mühlheim	102 m	1941–2016	1945 & 1946; 6–12/2002	100,0%
Offenbach	110 m	11/1957–10/1995	11/1977–11/1979	71,8%
Hanau	102 m	1951–02/1996	keine	90,3%
Hattersheim	88 m	1951–11/2003	keine	100,0%
Sulzbach	124 m	1951–2013	keine	100,0%
Heusenstamm	128 m	1941–04/2000	1945 & 1946	98,7%
Neu-Isenburg	130 m	1941–2008	1945 & 1946; 6-12/1987	98,2%

Die Messung der Niederschlagshöhe erfolgt generell in den Morgenstunden um 7:30 Uhr MEZ (bis 1986: 7 Uhr MEZ). Abweichungen von dieser Praxis sind an den hier verwendeten Stationen nicht bekannt. In den frühen Jahren wurde in Frankfurt/Main ein Regenmesser nach Mahlmann verwendet, der ab 1885 durch einen Regenmesser nach Hellmann mit 200 cm^2 Auffangfläche (Messung 1 m über der Erdoberfläche) ersetzt wurde (ZIEGLER & KÖNIG 1896). Insbesondere seit der Jahrtausendwende wird die Niederschlagsmenge an mehr und mehr Stationen vollständig elektronisch erfasst. Im Vergleich konventioneller, manueller Messungen mit automatischen Erfassungsmethoden wurde von AUGTER (2013) eine Tendenz zu leicht geringeren Niederschlagsmengen bei den Automatenwerten festgestellt. Für Frankfurt/Main Flughafen waren die Abweichungen der Jahressumme zwischen beiden Messmethoden in den beispielhaft untersuchten Jahren 2009 (-7 mm) und 2010 (+1 mm) jedoch marginal (AUGTER 2013).

3 Lufttemperatur

3.1 Langzeitliche Betrachtung

Die säkulare Entwicklung der Lufttemperatur im Raum Frankfurt/Main wird für die seit 1758 vorliegende, auf den heutigen Standort am Flughafen interpolierte Zeitreihe dargestellt (Abb. 2). Die deutliche Jahr-zu-Jahr-Variabilität überlagert bis in die 1980er-Jahre langzeitliche Trendentwicklungen. Die kältesten Jahre wurden am Ende der „Kleinen Eiszeit" zum Anfang und in der Mitte des 19. Jahrhunderts beobachtet. Beachtenswert ist, dass die aufgezeichneten Werte aufgrund von Qualitätsproblemen der Messungen bis Mitte des 19. Jahrhun-

derts tendenziell etwas zu hoch liegen (Kap. 2.2), also gegenüber den heutigen Werten tatsächlich wohl noch etwas kälter waren.

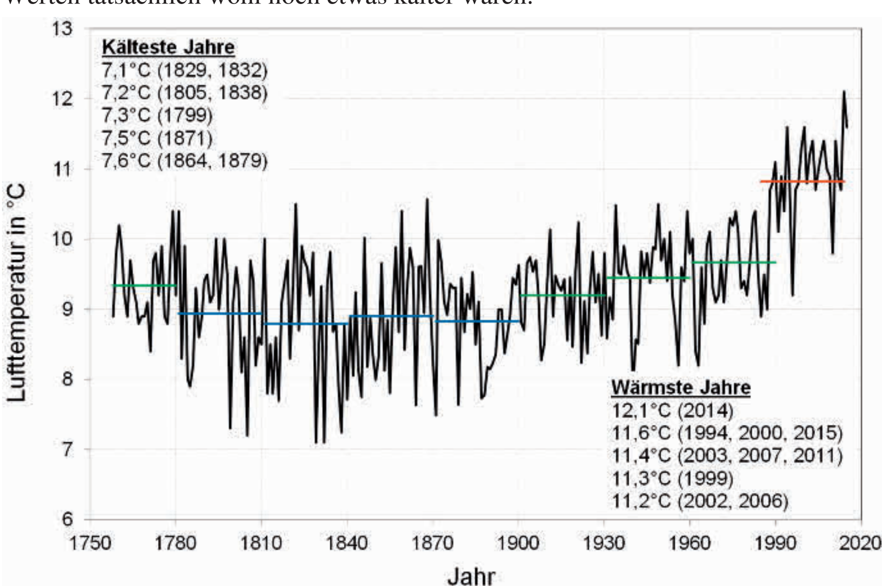


Abbildung 2: Jahresmitteltemperatur für Frankfurt/Main Flughafen für 1758–2015 auf Basis der auf den heutigen Standort angepassten Daten von BRINCKMANN (2005) und SCHÖNWIESE (2015); farbige Linien: jeweilige 30-jährige Mittelwerte der Klimanormalperioden (Ausnahme: 1758–1780 und aktuelle Periode 1986–2015).

Figure 2: Average yearly temperature for Frankfurt/Main airport for 1758–2015, based on data adapted to the actual location by BRINCKMANN (2005) and SCHÖNWIESE (2015); colored lines: 30-year-climate normals (with exceptions of the shorter 1758–1780 and the current 1986–2015 periods).

Die mit Abstand wärmsten Jahre traten allesamt in den vergangenen 30 Jahren auf. 24 der 28 Jahre seit 1988 waren (zumeist deutlich!) wärmer als jedes andere Jahr in den 230 Jahren zuvor – ein Signal regional sehr deutlicher Klimaveränderungen. Das jährliche Temperaturmittel stieg dabei von 9,7 °C in der Klimanormalperiode 1961–1990 auf 10,8 °C in den vergangenen 30 Jahren 1986–2015 an. Dieser Anstieg ist absolut außergewöhnlich, da die Schwankungsbreite der 30-jährigen gleitenden Mittelwerte bis in die 1980er-Jahre nur bei einem Kelvin lag (8,6 °C bis 9,6 °C). Diese 230 Jahre gültige Spannweite wurde nun innerhalb einer 30-jährigen Klimaperiode mehr als verdoppelt!

3.2 Entwicklung der Kälte- und Wärmerekorde

Ein weiterer Nachweis für die Verschiebung der Temperaturverhältnisse in Richtung wärmerer Bedingungen ergibt sich aus der Betrachtung der täglichen Kälte- und Wärmerekorde, die ab 1870 vorliegen (Abb. 3). Dazu wurden zunächst für jeden Kalendertag die jeweils höchsten und niedrigsten Werte ermittelt. Daraus ergeben sich je 365 Werte, verteilt über den 146-jährigen Gesamtzeitraum. Um standortbedingte Effekte bei der Interpretation der langfristigen

Entwicklung ausschließen zu können, sind hier zwei Zeitreihen dargestellt – einmal die der Frankfurter Innenstadt (türkis/orange) und einmal die der kombinierten Reihe Innenstadt-Flughafen (blau/rot).

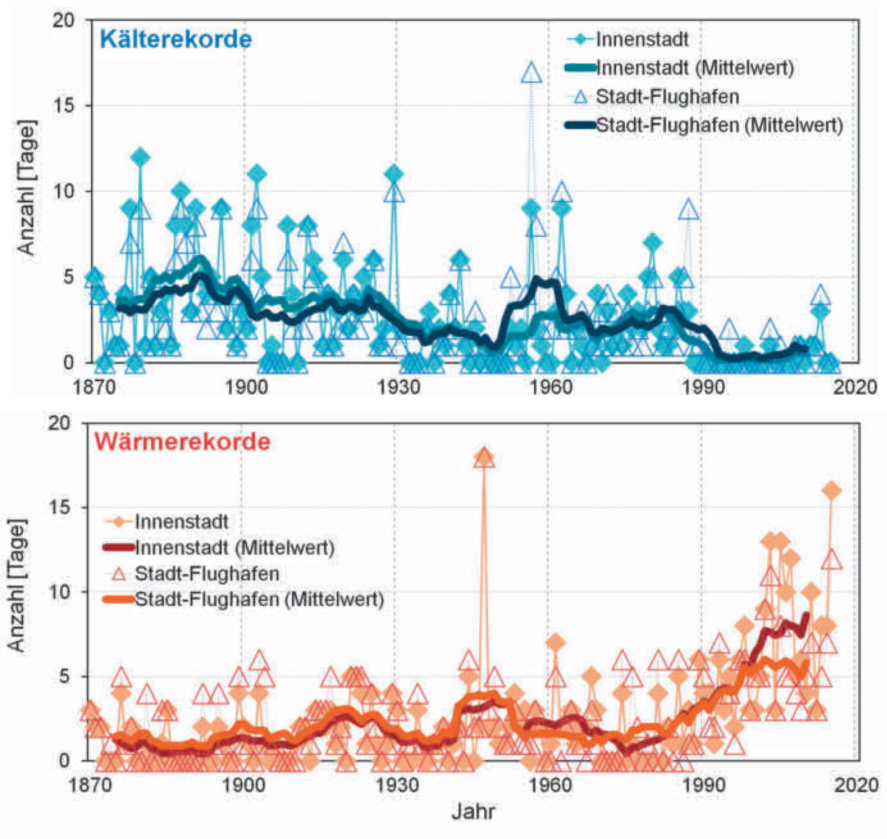


Abbildung 3: Verteilung der je 365 Kälte- und Wärmerekorde der Tagesmitteltemperatur im Zeitraum 1870–2015 (ein Rekord pro Kalendertag = 365 Rekordwerte); Linien: 11-jährig gleitende Mittelwerte; türkis-/orangefarbige Markierungen/Linien beziehen sich auf die Zeitreihe Frankfurt-Innenstadt, blau-/rotfarbige Markierungen/Linien auf die Kombination Innenstadt bis 1950/Flughafen ab 1951.

Figure 3: Distribution of the respective 365 cold and warm all-time records of daily temperature averages within 1870–2015 (one value per calendar day = 365 record values); lines: 11-year moving daily averages; turquoise/orange markings/lines refer to Frankfurt city time series; blue/red markings/lines refer to the combined time series Frankfurt city until 1950/ Frankfurt airport from 1951 onwards.

In einem stationären Klima sollte die Verteilung der Rekordwerte über die Zeit weitgehend konstant sein. Größere Auffälligkeiten – insbesondere bei Mittelung über einen längeren Zeitraum sichtbar (hier dargestellt das 11-jährig gleitende Mittel) – deuten hingegen auf Veränderungen einer Messreihe hin, die entweder klimatisch bedingt sind oder künstlich in die Reihe hineingetragen wurden (z. B. veränderte Standortbedingungen). Abbildung 3 zeigt, dass beide

Zeitreihen (Frankfurt Innenstadt in rot und Innenstadt/Flughafen in orange) in ihrer Entwicklung langfristig weitgehend übereinstimmen. Einzig der zwischenzeitliche Anstieg der Kälterekorde in den 1950er- und 1960er-Jahren der kombinierten Reihe ist auf die Standortverlagerung von der Innenstadt zum Flughafen zurückzuführen. Der langzeitlich zu beobachtende Rückgang der Kälte- und Anstieg der Wärmerekorde – der besonders deutlich am Ende der Zeitreihe sichtbar wird – ist hingegen mit den ansteigenden Mitteltemperaturen zu erklären. Nach 1987 traten nur noch an wenigen Tagen Kälterekorde auf, während die warmen Extreme seit den 1990er-Jahren etwa dreimal so häufig wie statistisch erwartbar vorkamen. Insbesondere die Wärmerekorde lassen daher eine deutliche Veränderung des Temperaturregimes in Frankfurt/Main in den rezenten 2–3 Jahrzehnten erkennen, die in den vergangenen 156 Jahren ohne Vergleich ist. Diese Veränderung ist aufgrund der großräumigen Repräsentativität der Lufttemperatur auch für einen größeren Raum (Rhein-Main-Region und generell Mitteleuropa) charakteristisch.

3.3 Jahresgang und Extremwerte

Die Mittelwerte der Klimanormalperiode 1961–1990 und der vergangenen 30 Jahre 1986–2015 sind in den ersten beiden Zeilen von Tabelle 4 für die Flughafenstation aufgeführt. Der Januar ist in Frankfurt der im Durchschnitt kälteste Monat, auch wenn er einer der Monate mit der stärksten Erwärmungsrate ist und dadurch der Unterschied zu den beiden anderen Wintermonaten inzwischen etwas geringer ausfällt. Der Juli ist, dicht gefolgt vom August, der wärmste Monat des Jahres. Der Jahresgang beträgt ca. 18 K und blieb im Vergleich beider Perioden durch die gleichzeitig starke Winter- und Sommererwärmung relativ unverändert.

Tabelle 4 zeigt außerdem die Temperaturwerte der kältesten und wärmsten Tage und Monate sowie das Jahr ihres Auftretens seit 1870 (kombinierte Innenstadt-Flughafen-Zeitreihe). Das niedrigste Temperaturminimum trat mit -23,8 °C am 19. Januar 1940 auf (2. Platz: -22,2 °C am 27.1.1942; 3. Platz: -21,6 °C am 13.1.1968), die kältesten Monate waren Januar 1942, Februar 1956 und Dezember 1879. In Ziegler & König (1901) sind die jährlich tiefsten Wintertemperaturen seit 1755 (mit einigen Lücken von 1777 bis 1790) angegeben. Diese lagen z. T. noch deutlich unter den ab 1870 gemessenen Werten (Min: -27,9 °C am 2.2.1830).

Das höchste Temperaturmaximum erreichte der 5. Juli 2015 mit 38,8 °C, ganz knapp gefolgt vom 7. August des gleichen Jahres und dem 9. August 2003 (38,7 °C). In der Frankfurter Innenstadt lag das Allzeitmaximum – auch bei Berücksichtigung der in Ziegler & König (1901) seit 1755 angegebenen höchsten Sommertemperaturen – bis 2014 übrigens mit 38,4 °C (9.8.2003) niedriger als am Flughafen. 2015 wurde dieser Wert allerdings zweimal deutlich überschritten: am 5. Juli mit 39,0 °C und noch deutlicher am 7. August mit 39,6 °C!

Tabelle 4: Temperaturstatistik von Frankfurt/Main für 1870–2015 (bis 1950: Innenstadt; ab 1951: Flughafen); Mittelwerte für die Zeiträume 1961–1990 und 1986–2015 (in der Tabelle bezeichnet als 61–90 und 86–15) und Extremwerte (tägliches Temperaturmaximum/-minimum: **Max*/Min***; maximales/minimales Monatsmittel: **Max^/Min^**) mit den Jahren ihres Auftretens

Table 4: Temperature statistics of Frankfurt/Main for 1870–2015 (until 1950: city; from 1951 onwards: airport); averages for periods 1961–1990 and 1986–2015 (named as 61–90 und 86–15 in the table) and extreme values (highest/lowest daily temperatures: **Max*/Min***; highest/lowest monthly averages: **Max^/Min^**) with year of occurrence

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
61-90	°C	0,7	1,8	5,2	9,2	13,7	17,1	18,9	18,3	14,8	9,8	4,7	1,8	9,7
86-15	°C	2,2	2,8	6,5	10,7	15,0	18,1	20,1	19,7	15,2	10,6	5,9	3,0	10,8
Max*	°C	16,2	19,0	24,7	30,5	34,8	**38,2**	**38,8**	**38,7**	34,6	28,0	20,0	16,5	**38,8**
	Jahr	1877	1900	1968	1949	1892	1947	2015	2003	1911	1985	1899	1915	2015
Max^	°C	6,1	7,5	9,3	14,3	17,9	21,9	24,0	23,7	18,6	13,4	9,1	7,2	12,1
	Jahr	2007	1926	1938	2007	1917	2003	2006	2003	1999	2006	1994	2015	2014
Min*	°C	-23,8	-21,5	-13,0	-7,1	-2,8	0,1	2,8	2,5	-0,3	-6,2	-12,7	-18,7	**-23,8**
	Jahr	1940	1929	1963	1986	1960	1975	1984	1978	1979	1912	1915	1879	1940
Min^	°C	-8,1	-8,0	0,6	6,4	10,6	12,9	15,8	15,2	10,8	6,0	0,7	-7,9	8,2
	Jahr	1940	1956	1883	1903	1902	1923	1919	1924	1912	1881	1921	1879	3mal

Der tägliche Verlauf von Mittel- und Extremwerten der Lufttemperatur ist in Abbildung 4 im Jahresgang für die kombinierte Innenstadt-Flughafen-Zeitreihe für 1870–2015 dargestellt. Auffällig ist, dass die Standardabweichung der mittleren Lufttemperatur im Winter größer und im Sommer kleiner ist als der Abstand zwischen mittlerem Minimum und Maximum. Die im Winter im Vergleich zum Sommer höhere Standardabweichung ist durch stärkere Jahr-zu-Jahr-Schwankungen in der kalten Jahreszeit bedingt. So beträgt der Unterschied zwischen der seit 1870 gemessenen niedrigsten (-18,0 °C) und höchsten Tagesmitteltemperatur im Winter (14,2 °C) 32,2 K, während er im Sommer nur 22,5 K beträgt (Extremwerte 8,1 °C und 30,6 °C). Der Unterschied der täglichen Höchst- und Tiefsttemperaturen ist aufgrund des höheren Sonnenstandes in Frühling und Sommer andererseits deutlich größer als in Herbst und Winter (z.B. Mai: 10,8 K; Dezember: 4,7 K).

Beim Vergleich der vergangenen 30 Jahre mit der Gesamtperiode (vgl. schwarze mit grüner Linie) ist in allen Jahreszeiten ein z. T. deutlicher Temperaturanstieg erkennbar. Der Jahresgang beider Zeiträume ist dennoch vergleichbar, von der deutlich stärkeren „Zappeligkeit“ der rezenten Kurve aufgrund des kürzeren Mittelungszeitraums abgesehen. Die im langjährigen Durchschnitt (1870–2015) höchsten Temperaturen treten am Monatswechsel von Juli zu August auf (den sog. „Hundstagen“), die tiefsten Temperaturen um Mitte Januar (dem sog. „Hochwinter“). Letztere Singularität, oder Witterungsregelfall, ist in den vergangenen Jahrzehnten (1986–2015) allerdings verschwunden und durch eine sehr milde winterliche Periode ersetzt worden.

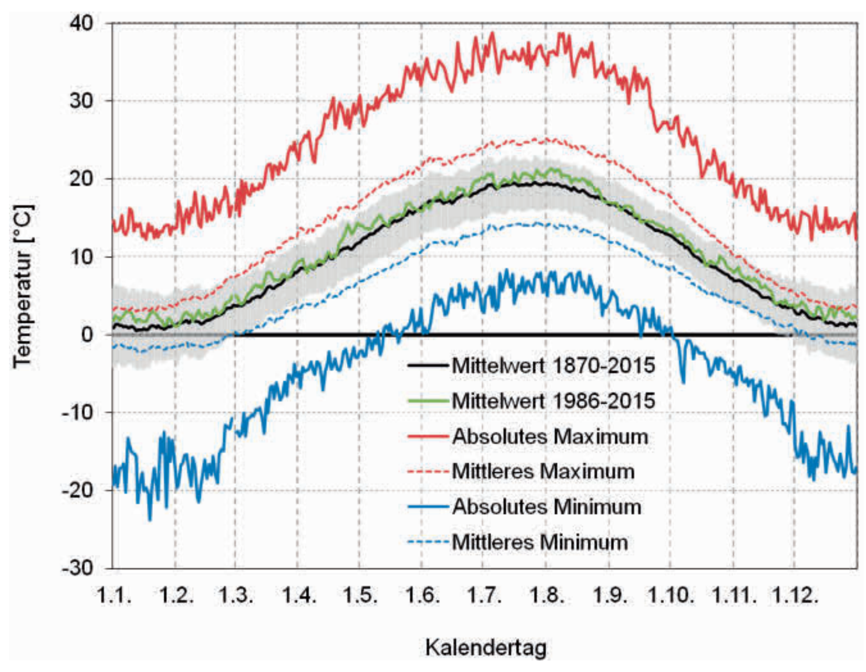


Abbildung 4: Innerjährlicher täglicher Verlauf von Mittel- und Extremwerten der Lufttemperatur (1870–2015; bis 1950: Innenstadt; ab 1951: Flughafen); graue Fläche: Standardabweichung Mittelwert 1870–2015.

Figure 4: Inner-annual daily course of average and extreme air temperature values (1870–2015; until 1950: city; from 1951 onwards: airport); grey area marks standard deviation from the 1870–2015 average.

In der langen Mittelungsperiode von 1870 bis 2015 sind bekannte Singularitäten wie die Eisheiligen oder das Weihnachtstauwetter kaum sichtbar, was letztlich auf die Vergänglichkeit dieser Erscheinungen hindeutet. Witterungsregelfälle ergeben sich aus der Verteilung der Großwetterlagen – da diese langfristig nicht konstant ist, kann sich eine in einem bestimmten Zeitraum sehr dominante Singularität in der folgenden Periode durchaus in ihr Gegenteil verkehren. Belastbare Prognosen des Witterungsverlaufes lassen sich daraus jedenfalls nicht ableiten. Die in den vergangenen Dekaden – mit Abstand – eindrucksvollste Singularität ist der deutliche Wärmesprung Ende April, der seit 1992 in fast jedem Jahr beobachtet wurde. 2016 war es hier im Zuge einer längeren Phase polaren Luftmasseneinflusses das erste Mal seit 25 Jahren wieder deutlich zu kühl. Ob dies ein Ausreißer oder ein Trendwechsel war, werden die kommenden Jahre zeigen.

4 Niederschlag

Die Niederschlagsverteilung einer Region und auch einer Stadt ist selbst in ihren langjährigen Mittelwerten – bei entsprechender topographischer Gliederung sogar bedeutenden – Variationen unterworfen, die vorrangig mit dem Einfluss

und der zeitlichen Verteilung von Anströmrichtungen und Großwetterlagen erklärt werden können. Der nordwestlich von Frankfurt/Main gelegene Taunus schwächt die von Nordwest und West kommenden Niederschlagsgebiete ab, während sich die selteneren, aus südlichen und östlichen Richtungen kommenden Niederschlagsgebiete im Luv des Taunus eher intensivieren. Zusätzlich beeinflussen weitere nahe Mittelgebirge den Frankfurter Raum, insbesondere Spessart und Odenwald.

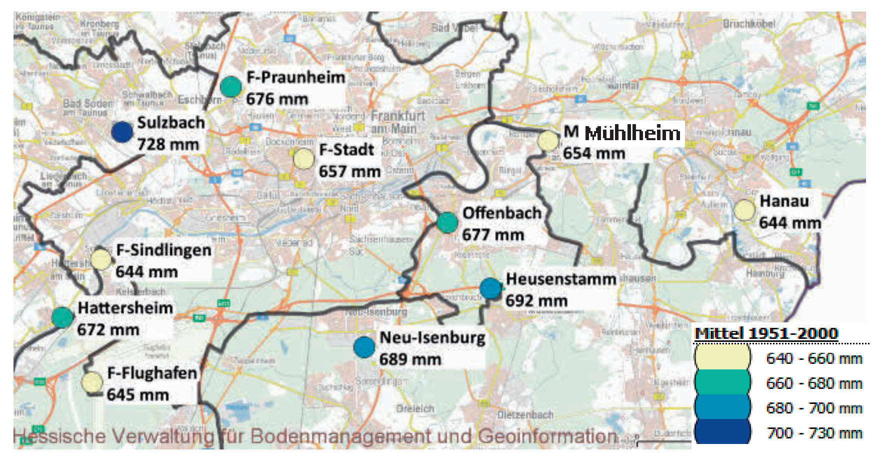


Abbildung 5: Mittlere Jahressumme des Niederschlags verschiedener Niederschlagsmessstationen im Raum Frankfurt/Main für den Zeitraum 1951–2000 (für Lücken/verkürzte Zeiträume s. Tab. 2)

Figure 5: Mean annual precipitation sum for precipitation observation stations in and around Frankfurt/Main for 1951–2000 (for gaps/shorter time frames see table 2)

Die unterschiedliche Verteilung der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge im Frankfurter Raum – hier dargestellt für den Zeitraum 1951–2000 – orientiert sich an diesen Gegebenheiten (Abb. 5). Der 50-jährige Zeitraum wurde kürzeren Perioden vorgezogen, um den Einfluss von zufälligen Einzelereignissen soweit als möglich zu minimieren. Sulzbach, wenngleich auf gleicher Höhenlage wie Frankfurt-Stadt und nur wenige Kilometer weiter westlich gelegen, profitiert mit im Vergleich über 50 mm Jahresniederschlag mehr von der unmittelbaren Taunusnähe (Abb. 5). Diese Station hat in jeder der sechs Dekaden seit den 1950er-Jahren die höchste mittlere Niederschlagsmenge aller Stationen zu verzeichnen. Die im Vergleich zu den anderen Stationen ebenfalls höheren Werte in Neu-Isenburg und Heusenstamm sind wahrscheinlich auf die Nähe zu den südöstlich von ihren Standorten beginnenden Hügelketten zurückzuführen.

Die Verteilung des mittleren täglichen Niederschlags über den Gesamtzeitraum (1870–2015) zeigt vier recht gut voneinander abgrenzbare Niederschlagsniveaus (Abb. 6): 1) vergleichsweise geringe Niederschlagsmengen von der zweiten Januardekade bis zur zweiten Aprildekade[4], 2) ein mittleres Niveau im kur-

[4] Als Dekaden werden in der Meteorologie neben den üblichen Zehnjahreszeiträumen auch Monatsdrittel bezeichnet (1. Dekade: 1.-10.; 2. Dekade: 11.-20.; 3. Dekade: 21.-Monatsende)

zen Zeitraum von Ende April bis zur zweiten Maidekade, 3) hohe Niederschlagsmengen von Ende Mai bis August und 4) ein mittleres Niveau im Rest des Jahres (September bis Anfang Januar). Eine Abbildung der jährlichen Zeitreihe der Jahresniederschlagsmenge für den Gesamtzeitraum 1870–2015 wird in diesem Beitrag nicht gezeigt, da die Belastbarkeit der Veränderungen vor 1951 aufgrund von fehlenden Metadaten und wechselnden Standorten als nicht gesichert angesehen werden kann.

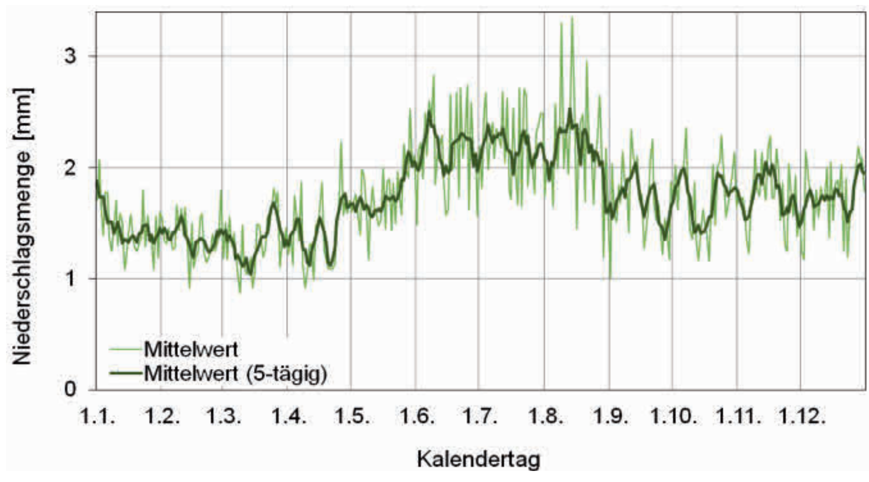


Abbildung 6: Jahresgang der mittleren täglichen Niederschlagsmenge Frankfurt/Main (1870 – 2015; bis 1950: Innenstadt; ab 1951: Flughafen).

Figure 6: Annual cycle of average daily precipitation sum for Frankfurt/Main (1870–2015; until 1950: city; from 1951 onwards: airport).

Für die Niederschlagsstatistik der Frankfurter Reihe (Tab. 5) wird die kombinierte, auf den Standortwechsel nicht homogenisierte Zeitreihe täglicher Werte der Frankfurter Stadtstation (bis 1950) und dem Standort am Flughafen (ab 1951) verwendet. Im oberen Teil der Tabelle werden die Mittelwerte der Klimanormalperiode 1961–1990 und der vergangenen 30 Jahre 1986–2015 für den Standort am Flughafen gezeigt. Der Monat mit der höchsten mittleren Niederschlagsmenge verschiebt sich je nach betrachteter langjähriger Periode im Laufe der Zeit, befindet sich aber immer im Sommer (Juni, Juli oder August).

Das jährliche Niederschlagsminimum verschob sich in jüngster Zeit vom Februar (40 mm in der Periode 1961–1990) in den April hinein (37 mm in der Periode 1986–2015; Tab. 5). Seit Ende der 1980er-Jahre fiel in etwa der Hälfte aller Aprilmonate häufig deutlich weniger als 30 mm Monatsniederschlag. Insgesamt ist am Frankfurter Flughafen in den vergangenen 30 Jahren (1986–2015) im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 ein Niederschlagsrückgang um ca. 10% zu beobachten, der fast ausschließlich auf geringere Niederschläge im November und von März bis Juni zurückzuführen ist. Fehlender Niederschlag in der Pflanzenwachstumsphase stellt insbesondere für die Landwirtschaft eine Herausforderung dar.

Tabelle 5: Niederschlagsstatistik von Frankfurt/Main für 1870–2015 (bis 1950: Innenstadt; ab 1951: Flughafen); Mittelwerte für die Zeiträume 1961–1990 und 1986–2015 (in der Tabelle bezeichnet als 61–90 und 86–15) und Extremwerte (24-stündiges Niederschlagsmaximum: **Max***; maximale/minimale Monatssumme: **Max^/Min^**) mit den Jahren ihres Auftretens

Table 5: Precipitation statistics of Frankfurt/Main for 1870–2015 (until 1950: city; from 1951 onwards: airport); averages for periods 1961–1990 and 1986–2015 (named as 61–90 und 86–15 in the table) and extreme values (highest 24h-values: **Max***; highest/lowest monthly sums: **Max^/Min^**) with year of occurrence

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
61-90	mm	43	40	51	51	62	69	64	64	48	50	60	55	658
86-15	mm	44	41	43	37	55	58	67	58	51	52	49	54	604
Max*	mm	33,7	25,1	32,4	33,2	55,3	65,0	82,7	**109,7**	44,0	44,4	41,2	64,0	**109,7**
	Jahr	1936	1962	1957	1871	1944	1930	1999	1981	1967	1894	1939	1891	1981
Max^	mm	119	119	115	110	158	182	203	**223**	149	169	153	160	**1057**
	Jahr	1995	1977	2001	1965	1978	1961	1882	1922	1957	1923	1872	1993	1965
Min^	mm	2,3	0,8	3,3	**0,1**	4,3	9,0	1,0	1,4	0,7	3,9	1,1	1,1	**354**
	Jahr	1996	1896	1929	2007	1896	1962	1921	1991	1890	1908	2011	1890	1921

Im Gegensatz zur Temperatur sind Niederschlagsveränderungen selbst bei nachgewiesener Homogenität der Zeitreihe nicht zwangsläufig regional einheitlich. Leider wurden die meisten der hier verwendeten Niederschlagsstationen im Frankfurter Raum zwischen 1995 und 2008 stillgelegt, so dass der Niederschlagsrückgang am Flughafen (1986–2015 vs. 1961–1990) nur mit den Standorten Mühlheim (vergleichbarer Rückgang der Niederschlagsmenge) und Frankfurt-Stadt (keine Veränderung der Jahresmenge; Aussage aufgrund von Standortveränderungen nicht gesichert, siehe Tab. 2) verglichen werden kann. Im hessischen Landesmittel ist nur ein geringer Rückgang von 10 mm festzustellen, so dass die deutliche Veränderung am Flughafen im Zweifelsfall ein eher lokales Phänomen darstellt, das nur bedingt regionale Aussagekraft besitzt.

Bei Einbeziehung des Stationskollektives (Tab. 3; Daten ab 1951) waren die 1960er- und 1980er-Jahre an allen Stationen die nassesten Dekaden und die 1970er-Jahre das trockenste Jahrzehnt. Die Jahre 1965 und 1981 treten dabei mit um oder über 1.000 mm/Jahr besonders hervor, alle anderen Jahre weisen flächendeckend, an allen hier betrachteten Stationen, weniger als 900 mm/Jahr auf. In der langen Frankfurter Reihe erreicht nur das Jahr 1882 noch ähnlich hohe Werte. Mit Ausnahme von Sindlingen war 1976 überall das trockenste Jahr.

Die trockensten und nassesten Monate sowie die höchsten täglichen Niederschläge in der kombinierten Frankfurter Reihe sind in Tabelle 5 ersichtlich. Die für Abbildung 6 beschriebenen vier Niederschlagsniveaus werden auch bei Betrachtung der nassen Extreme sichtbar, sowohl auf Monats- als auch Tagesbasis. Von Januar bis April werden maximal etwas mehr als 30 mm Tagesniederschlag und Monatssummen von nur wenig über 100 mm erreicht. Eine mittlere Position nimmt das Jahresende mit Tagesniederschlagsmengen über 40 mm (Dezember einmalig 65 mm, zweithöchster Wert 40,9 mm) und maximalen

Monatsniederschlägen von zumeist etwas mehr als 150 mm ein. Von Juni bis August treten hingegen z. T. sehr hohe tägliche und monatliche Extreme auf.

Große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit (wenige Minuten bis zu einem Tag) fallen im Frankfurter Raum zumeist zwischen Mai und August (Tab. 5). Von 1870 bis 2015 traten in der kombinierten Innenstadt-Flughafen-Reihe insgesamt 22 Ereignisse mit mehr als 50 mm Niederschlag in 24 Stunden auf, die sich mit einer Ausnahme (15. Dezember 1891) in der erwähnten Periode befanden. An fünf Tagen – alle im Hochsommer (Juli und August) gelegen – fielen mehr als 70 mm Niederschlag. Auch bei Betrachtung aller im Frankfurter Raum verfügbaren Zeitreihen (Tab. 3) traten Niederschlagssummen über 70 mm nur zwischen dem 25. Juni und dem 30. August auf.

Solche Niederschlagsmengen in kurzen Zeiträumen führen zu einer Vielzahl von Problemen – angefangen von Hochwasser auch größerer Flüsse bei großflächigen Ereignissen bis hin zu Sturzfluten und lokalen, häufig sehr plötzlich auftretenden Überflutungen bei kleineren, häufig konvektiv bedingten Vorfällen. Hinzu kommen in beiden Fällen Bodenerosions- und Hangrutschungsgefahren.

Mit Ausnahme von Hattersheim[5] traten die höchsten 24-stündigen Niederschlagsmengen aller im Frankfurter Raum gelegenen Stationen (bezogen auf die in Tab. 3 angegebene Datenverfügbarkeit) am 9. August 1981 auf. Drei Stationen hatten mehr als 100 mm Niederschlag vorzuweisen (Frankfurt-Flughafen, Hattersheim und Neu-Isenburg), an allen Stationen fielen mindestens 70 mm. Da sich die starken Niederschläge bis in den Folgetag (10. August) hinein erstreckten, kamen so im Raum Frankfurt in 48 Stunden zwischen 128 mm (Frankfurt-Stadt) und 176 mm Niederschlag (Neu-Isenburg) zusammen (Abb. 7). An beiden Tagen lag ein quasi-stationäres Niederschlagsband über der Mitte Deutschlands, aus dem es langanhaltend und ergiebig regnete. Der meiste Niederschlag fiel dabei in einem Streifen, der sich vom Frankfurter Raum bis ins östliche Thüringen hinein erstreckte.

Eine vergleichbare Situation, wenn auch mit flächig gesehen etwas geringeren Niederschlagsmengen, herrschte am 6. Juli 1999 vor – die Niederschlagsmaxima traten hier zwischen dem nordöstlichen Hunsrück und dem südöstlichen Frankfurt auf. Erwähnt werden soll noch das Ereignis vom 14. und 15. August 1922, bei dem in Frankfurt-Stadt 149 mm in 48 Stunden fielen, zu je gleichen Teilen gesplittet zwischen beiden Tagen. Hier liegen leider noch keine Vergleichsdaten naher Stationen vor[6]. Die Temperaturgegensätze zwischen Nord- und Süddeutschland und hohe Niederschlagssummen von Rheinland-Pfalz/Baden-Württemberg bis nach Thüringen/Südsachsen suggerieren jedoch eine Luftmassengrenze, die sich nur langsam in Richtung Alpen verlagerte.

[5] Hier hatte ein Starkregenereignis am 6. Juli 1999 eine etwas höhere Menge aufzuweisen (106,7 mm; am 9. August 1981 fielen „nur“ 102,8 mm)

[6] Fortlaufende Digitalisierungsbemühungen des Deutschen Wetterdienstes lassen eine digitale Verfügbarkeit bisher nur in Archiven greifbarer Klimadaten erhoffen.

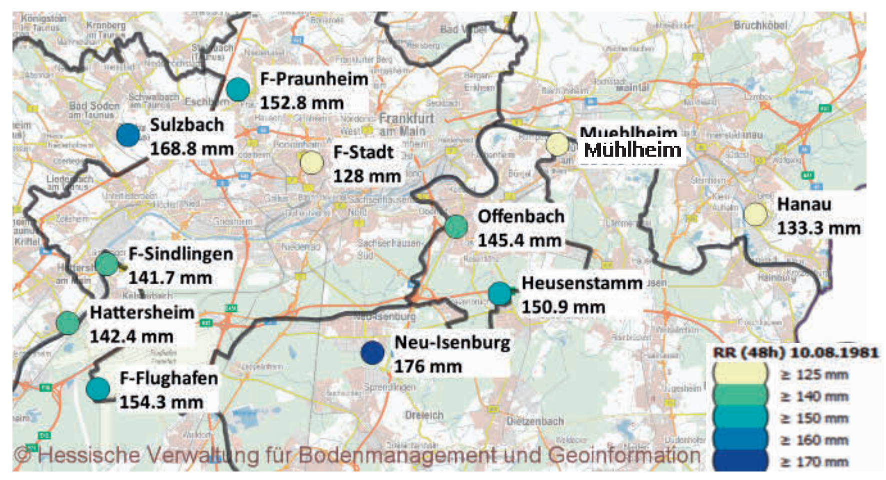


Abbildung 7: 48-stündige Summe der Niederschlagsmenge am 9./10. August 1981.
Figure 7: 48-hourly precipitation sum 9th / 10th August 1981.

5 Zusammenfassung und Fazit

Der vorliegende Beitrag widmet sich der Betrachtung der langzeitlich vorliegenden Klimadaten aus Frankfurt/Main Innenstadt (seit 1758 bzw. 1870) und Frankfurt/Main Flughafen (seit 1951). Dabei werden Mittelwerte und Veränderungen im Temperatur- und Niederschlagsregime auf verschiedenen Zeitskalen analysiert. Der Beitrag erweitert das Spektrum klimatologischer Betrachtungen im hessischen, aber auch deutsch-europäischen Raum und gibt einen aktuellen Einblick in gegenwärtig zu beobachtende Klimaveränderungen, u. a. durch Nutzung des aktuellen 30-jährigen Zeitraums 1986–2015.

In Kapitel 2 werden **Datengrundlage und -qualität** der Frankfurter Klimazeitreihen ausführlich diskutiert. Die Zeitreihe der jährlichen Lufttemperatur seit 1758 basiert vor dem Jahr 1870 auf alten Quellenangaben, die im Laufe der Zeit von mehreren Wissenschaftlern akribisch überprüft und ausgewertet wurden. Die in täglicher Auflösung seit 1870 vorliegenden Klimadaten sind über den DWD digital zugänglich, inklusive verschiedener Metadaten zu den Zeitreihen. In diesem Beitrag werden die Daten von Lufttemperatur (tägliche Mittelwerte, Minima und Maxima) und Niederschlag (tägliche Summe) verwendet. Zwei kleinere Lücken der Innenstadtstation wurden über nahegelegene Nachbarstationen gefüllt. Der Einfluss von Urbanisierungseffekten auf die Lufttemperatur wird im Vergleich von Innenstadt- und Flughafenstation diskutiert. Elf in und um Frankfurt gelegene Niederschlagsmessstationen werden verwendet, um der (gegenüber der Lufttemperatur) deutlich größeren Heterogenität des Parameters Niederschlag Rechnung zu tragen.

Veränderungen der Lufttemperatur seit 1758 (auf jährlicher Basis) bzw. 1870 (auf täglicher Basis) werden in Kapitel 3 analysiert. Stärkstes Änderungssignal ist die sehr deutliche Erwärmung seit 1988. In der 260-jährigen Zeitreihe überlagert die natürliche Jahr-zu-Jahr-Variabilität bis in die 1980er-Jahre hinein

zumeist langzeitliche Trendentwicklungen, seit 1988 waren jedoch 24 der 28 Jahre (zumeist deutlich) wärmer als jedes andere Jahr in den 230 Jahren zuvor. Die seit 1758 gültige klimatische Schwankungsbreite von 1 K (basierend auf 30-jährig gleitenden Mittelwerten) wurde in den vergangenen 30 Jahren (1986–2015) aufgrund des starken Temperaturanstiegs auf 2 K verdoppelt. Gleichzeitig traten seit 1988 kaum noch Kälterekorde, dafür umso mehr Wärmerekorde auf. Warme Extreme kamen seitdem etwa dreimal so häufig wie statistisch erwartbar vor.

Die Erwärmung der vergangenen 30 Jahre (1986–2015, verglichen mit 1961–1990) trat ganzjährig auf, am deutlichsten im Januar, April und August, am geringsten im September und Oktober. Der Zeitpunkt der tiefsten jährlichen Temperaturen hat sich vom sog. „Hochwinter“ Mitte Januar in den vergangenen 30 Jahren in Richtung Ende Januar/Anfang Februar verschoben, die im Mittel höchsten Temperaturen traten weiterhin zu den sog. „Hundstagen“ Ende Juli/Anfang August auf. Die tiefsten Wintertemperaturen wurden vor langer Zeit aufgezeichnet – im 18. und 19. Jahrhundert traten selbst in der Frankfurter Innenstadt nicht selten Winter mit Tiefstwerten unter -20 °C auf (Minimum: -27,9 °C am 2.2.1830). Die höchsten Temperaturen wurden hingegen am Ende der Zeitreihe im Sommer 2015 gemessen, wo am 7. August an der Station in der Frankfurter Innenstadt fast 40 °C erreicht wurden (39,6 °C). Im Vergleich mit einem Kollektiv von 42 langjährigen europäischen Klimastationen von England bis in die Ukraine stellte die Frankfurter Überschreitung der früheren Rekordwerte den deutlichsten Temperatursprung dar (Hoy et al. 2016).

Variationen des Niederschlags, die in Kapitel 4 betrachtet werden, sind räumlich und zeitlich deutlich heterogener als die der Temperatur. Die jährlichen Mittelwerte der Niederschlagssumme im Zeitraum 1951–2000 liegen in der Frankfurter Region (ohne Taunus) zwischen 644 und 728 mm bei recht ähnlicher Höhenlage (88 bis 130 m ü. NN). Die Ungleichheiten sind vorranging durch die je nach Anströmrichtung wirksame unterschiedliche topografische Beeinflussung bedingt. Die im langjährigen Durchschnitt geringsten Niederschlagsmengen fallen von Mitte Januar bis Mitte April, während insbesondere von Anfang Juni bis Mitte August im Mittel vergleichsweise hohe tägliche Mengen registriert werden. In den vergangenen 30 Jahren (1986–2015, verglichen mit 1961–1990) verschob sich das jährliche Niederschlagsminimum vom Februar in den April hinein.

Aufgrund der starken jährlichen sowie dekadischen Schwankungen der Niederschlagsmenge kann, auch bei Verwendung der Frankfurter Innenstadtdaten ab 1870, keine gesicherte Trendaussage aus den beobachteten Veränderungen abgeleitet werden. Entscheidende Faktoren sind hier auch Unsicherheiten und Veränderungen in den Messmethoden und -geräten. Seit 1951 waren die 1960er- und 1980er-Jahre an allen Stationen am nassesten und die 1970er-Jahre am trockensten. Sehr hohe Niederschlagsmengen in kurzer Zeit fallen zumeist zwischen Mai und August. Extrem hohe Tagesniederschlagsmengen über 70 mm traten an allen elf Stationen allerdings nur im Juli und August auf. Die auch flächendeckend größten Niederschlagsmengen seit 1951 fielen am 9. und 10. August 1981 und am 6. Juli 1999 mit z. T. über 100 mm Niederschlag in 24 Stunden.

Abschließend sei bemerkt, dass Variationen klimatischer Verhältnisse per se natürliche Phänomene sind, die dem Begriff des Klimas inhärent sind. Konstante klimatische Verhältnisse existieren nicht und haben zu keiner Zeit an keinem Ort der Erde existiert. Im erdgeschichtlichen Kontext waren die globalen klimatischen Verhältnisse der vergangenen Jahrtausende sogar bemerkenswert konstant. Dennoch sind die in den rezenten Jahrzehnten weltweit beobachteten klimatischen Veränderungen im Kontext der vergangenen Jahrhunderte einmalig. Dies trifft insbesondere auf Veränderungen der Lufttemperatur zu. Diese lassen sich anhand von z. T. seit dem 17. Jahrhundert vorliegenden Messreihen aus Paris (seit 1658; ROUSSEAU 2015), Mittelengland (seit 1659; MANLEY 1974, aktualisiert) und weiteren europäischen Standorten nach dem Jahr 1700 sowie der von verschiedenen Instituten (z.B. NASA, NOAA, CRU, BerkeleyEarth) erhobenen globalen Durchschnittstemperatur belegen. Eine proxybasierte Rekonstruktion europäischer Sommertemperaturen bestätigt die klimatische Außergewöhnlichkeit der rezenten Dekaden für den europäischen Sommerzeitraum (Juni bis August) sogar für die vergangenen zwei Jahrtausende (LUTERBACHER et al. 2016). In der zitierten Studie war der (auch hier verwendete) rezente Zeitraum 1986–2015 die wärmste Periode überhaupt. Die für Frankfurt/Main in diesem Beitrag seit 1758 bzw. 1870 diskutierten Temperaturveränderungen ordnen sich in dieses Gesamtbild ein und erweitern es auf regionaler Ebene.

6 Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Schönwiese (Goethe Universität Frankfurt/Main, emeritiert) für Quellenhinweise und fachliche Diskussionsmöglichkeiten, ebenso bei den Kolleginnen des Fachzentrum Klimawandel Hessen für die kritische Durchsicht der Arbeit. Außerdem herzlichen Dank an die Bibliothek des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie sowie die Hochschul- und Landesbibliothek Rhein-Main für die Bereitstellung von z. T. sehr alter Literaturquellen.

7 Literatur

AUER, I., BÖHM, R. & SCHÖNER, W. (2001): Austrian Long-term Climate 1767 - 2000: Multiple Instrumental Climate Time Series from Central Europe.– Österr. Beiträge Meteorol. Geophys., **25**: 155 S.; Wien (ZAMG).

ANIOL, R. (1954): Über starke Niederschläge im Gebiet Taunus – Odenwald.– Ber. Dt. Wetterdienst, **11**: 16 S.; Offenbach a. M.

AUGTER, G. (2013): Vergleich der Referenzmessungen des Deutschen Wetterdienstes mit automatisch gewonnenen Messwerten. 2. Aufl.– Ber. Dt. Wetterdienst, **238**: 61 S.; Offenbach a. M.

BÖHM, R., JONES, P.D., HIEBL, J., FRANK, D., BRUNETTI, M. & MAUGERI, M. (2010): The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760–2007.– Clim. Change **101(1-2)**: 41-67. DOI: 10.1007/s10584-009-9649-4.

BRÁZDIL, R., BĚLÍNOVÁ, M., DOBROVOLNÝ, P., MIKŠOVSKÝ, J., PIŠOFT, P., ŘEZNÍČKOVÁ, L., ŠTĚPÁNEK, P., VALÁŠEK, H. & ZAHRADNÍČEK, P. (2012): History of Weather and Climate in the Czech Lands IX. Temperature and Precipitation Fluctuations in the Czech Lands During the Instrumental Period. Masaryk University.– 236 S,; Brno; ISBN 978-80-210-6052-4.

BRINCKMANN, S. (2005): Anwendung der schrittweisen Regression auf Temperatur-Zeitreihen zur Separierung anthropogener und natürlicher Einflüsse. Diplomarbeit. Univ. Frankfurt a. M.– 116 S.; Frankfurt a. M.

EISENHARDT, T. (1968): Klimaschwankungen im Rhein-Main-Gebiet seit 1880.– Forschungen zur deutschen Landeskunde, **165**: 87 S.; Bad Godesberg.

FRÜH, B., KOßMANN, M. & ROOS, M. (2011): Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung.– Ber. Dt. Wetterdienst, **237**: 68 S.; Offenbach a. M.

GRIESEL, H. (1988): Das Klima von Frankfurt 1756–1980. Diplomarbeit. Univ. Frankfurt a. M.– 266 S.; Frankfurt a. M.

HIEN, S. (2012): Höhengradient des Niederschlags im Taunus. Bachelorarbeit. Univ. Frankfurt a. M.– 62 S.; Frankfurt a. M.

HOY, A., HÄNSEL, S., SKALAK, P., USTRNUL, Z. & BOCHNÍČEK, O. (2016): The extreme European summer of 2015 in a long-term perspective.– Int. J. Climatol.; doi: 10.1002/joc.4751.

KASPAR, F. & HANNAK, L. (2016): Zur Auswirkung der Automatisierung der Temperaturmessungen auf die Messreihen des Deutschen Wetterdienstes.– Mitteilungen DMG, **02/2016**: 8-9: Berlin.

LUTERBACHER, J, WERNER, J.P., SMERDON, J.E. et al. (2016): European summer temperatures since Roman times.– Env. Res. Letters, **11**: 024001, 12 S.; doi: 10.1088/1748-9326/11/1/024001.

MANLEY, G (1974): Central England Temperatures: monthly means 1659 to 1973.– Q.J.R. Meteorol. Soc.; **100**: 389-405.

MOLLWO, H. (1958): Klimawerte von Frankfurt/Main 1857-1956.– Ber. Dt. Wetterdienst, **43**: 60 S.; Offenbach a. M.

PARKER, D.E. (1994): Effects of changing exposure of thermometers at land stations.– Int. J. Climatol., **14(1)**: 1–31; DOI: 10.1002/joc.3370140102.

RAPP, J. (2000): Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland.– Ber. Dt. Wetterdienst, **212**: 145 S.; Offenbach a. M.

RAPP, J. & SCHÖNWIESE, C.D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990, 2. Aufl.– Frankfurter Geowiss. Arb**., B5**: 253 S.; Frankfurt a. M.

ROUSSEAU, D. (2015): Variabilité des températures mensuelles à Paris de 1658 à 2014.– XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie.– 597-602; Liège.

SCHÖNWIESE, C.D. (2015): Die Temperaturreihe Frankfurt a. M. 1758–2014.– Mitteilungen DMG, **02/2015**: 8; Berlin.

WACHTER, H. (1939): Das Klima von Frankfurt am Main, Nachtrag III.– Ber. Meteor.-Geophys. Inst. Frankfurt a. M., **5**: 31 S.; Frankfurt a. M.

WINKLER, P. (2009): Revision and necessary correction of the long-term temperature series of Hohenpeissenberg, 1781–2006.– Theor. Appl. Climatol., **98(3-4)**: 259–268; doi: 10.1007/s00704-009-0108-y.

ZIEGLER, J. & KÖNIG, W. (1896): Das Klima von Frankfurt am Main. Frankfurt a. M.– 68 S.; Frankfurt a. M. (Naumann´s Druckerei).

ZIEGLER, J. & KÖNIG, W. (1901): Das Klima von Frankfurt am Main, Nachtrag. Frankfurt a. M.– 51 S.; Frankfurt a. M. (Naumann´s Druckerei).

DR. ANDREAS HOY
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustr. 186
65203 Wiesbaden
Tel.: 0611/6939-252
Email: andreas.hoy@hlnug.hessen.de

Manuskripteingang; 26. August 2016